

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160314

塔里木河下游植被空间分布特征及其用水策略

易小波¹ 邵明安^{2,3} 袁国富³ 杜涛^{3,4} 朱绪超^{3,4}

(1 西北农林科技大学资源环境学院 2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室)

(3 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 4 中国科学院研究生院)

摘要:采用点位监测和取样测定的方法对塔里木河下游植被空间分布和影响因素进行了研究。定点监测选取了柽柳样地和胡杨样地各一个,取样测定选取了16个断面共计67个样点。结果表明:地下水位和植被盖度随着离河道距离增加分别呈显著性对数和指数下降关系。不同质地土壤的持水性有显著差异,粉壤土的田间持水量(0.32 g/g)为沙土田间持水量(0.10 g/g)的3倍以上,前者的有效含水量约为后者的1.6倍。植被盖度受地下水位和土壤含水量的共同影响。胡杨和柽柳均具有适应极端干旱环境的能力,但二者的用水策略不同。胡杨根系可以直接吸收地下水和土壤水,且在生长季有明显的水力提升现象;柽柳根系主要吸收地下水和近地下水位饱和土壤水。

关键词:植被盖度;地下水;土壤质地;塔里木河下游;柽柳;胡杨

中图分类号:S715-3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2017)05-0001-08

YI Xiao-bo¹; SHAO Ming-an^{2,3}; YUAN Guo-fu³; DU Tao^{3,4}; ZHU Xu-chao^{3,4}. **Spatial distribution of vegetation and its strategy in using water in the lower reaches of the Tarim River, western China.**

Journal of Beijing Forestry University (2017)39(5) 1-8 [Ch, 28 ref.]

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, P. R. China;

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, P. R. China;

3 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, P. R. China;

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China.

Spatial distribution of vegetation and their influencing factors in the lower reaches of the Tarim River of western China were studied by the method of situ observations and sampling. 67 sampling points in 16 transects were selected, and two stands, the *Tamarisk* spp. stand and the *Populus euphratica* stand, were selected for situ observations. With the increase of the distance to the river channel, the groundwater level logarithmically declined, and vegetation cover exponentially decreased, respectively. Soil textures had significant impacts on soil water retention. The field capacity of silty loam (0.32 g/g) was more than 3 folds of that of sandy soil (0.10 g/g), and the effective water content of the former was 1.6 folds of the latter. The vegetation cover was controlled by the groundwater level and soil water content together. *Populus euphratica* and *Tamarix* spp. had the ability to adapt to hyper-dry environment, but the water use strategies of them were different. Roots of *Populus euphratica* directly took up groundwater and soil water, and had the obvious hydraulic lift during the growing season. However, *Tamarix* spp. roots mainly absorbed groundwater and the saturated soil water in the layer near the groundwater level.

Key words vegetation coverage; groundwater; soil texture; the lower reaches of the Tarim River; *Tamarix* spp.; *Populus euphratica*

收稿日期: 2016-09-30 修回日期: 2017-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271050)。

第一作者: 易小波,博士生。主要研究方向:环境生态。Email:abobobi@163.com 地址:712100 陕西杨凌邰城路3号西北农林科技大学南校区资源环境学院。

责任作者: 邵明安,研究员,博士生导师。主要研究方向:土壤物理。Email:shaoma@igsnrr.ac.cn 地址:100101 北京市朝阳区大屯路甲11号中国科学院地理科学与资源研究所。袁国富,副研究员。主要研究方向:生态水文。Email:yuangf@igsnrr.ac.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

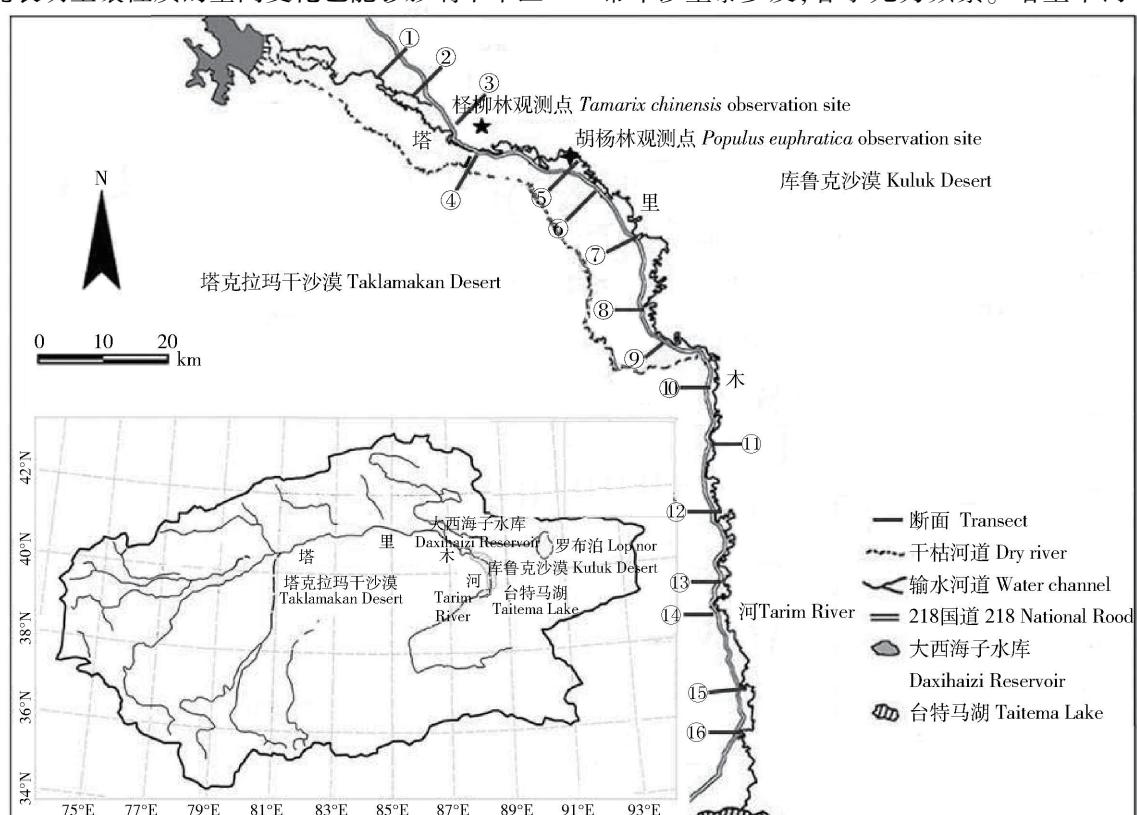
荒漠河岸林生态系统是干旱区一类重要的生态系统,对维持陆地生态系统生物多样性、防治土地沙漠化具有重要的意义。干旱区荒漠河岸植被受水分条件限制,其空间分布和结构特征通常受制于河道形态和离河道距离或者地下水位^[1]。目前我国干旱区荒漠河岸植被空间分布的研究主要基于样地调查和遥感反演两种手段。于军等^[2]通过样地调查研究了塔里木河流域胡杨群落的空间分布格局,发现优势种胡杨和灰胡杨种群径级结构均呈倒金字塔型,属衰退型种群。朱绪超等^[3]等利用遥感监督分类的方法对塔河下游植被分布进行了研究,结果表明胡杨疏林总体更靠近河道,柽柳灌丛分布范围更广,且整体植被盖度很低。

关于干旱区内陆河流域植被空间分布的影响因素,目前主要是从地下水控制的角度出发,探讨地下水位对植物生长和生理性质的影响,取得了丰硕的研究成果^[4-6]。通过对地下水位变化及植被对其响应研究,可以确定植物生长的适宜地下水位^[7-9]或者需水量^[10-11],这对内陆河流域水资源管理具有重要的参考价值。然而,由于内陆河流域植被空间分布在不同尺度上具有很强的异质性,单纯的地下水位变化无法充分解释植被分布规律。近年来,有学者研究表明土壤性质的空间变化也能够影响干旱区

植被的空间分布特征^[12-18]。然而,关于地下水和土壤性质对干旱区植被空间分布特征的综合影响目前研究还不够深入。为进一步认识内陆河流域植被分布的内在影响规律,本文采用取样测定和点位监测的方法对塔里木河下游土壤质地,地下水位和植被空间分布特征及其相互关系进行了研究,旨在揭示土壤性质和地下水位变化对塔里木河下游植被空间分布的影响,以期为内陆河流域水资源管理、植被建设和生态恢复提供科学依据。

1 研究区概况

塔里木河位于新疆南部塔里木盆地,是中国境内最大的内陆河,全长1 321 km,流域总面积17 600 km²。塔里木河下游(图1)从大西海子水库到尾闾湖台特马湖长约250 km,东邻库鲁克沙漠,西接塔克拉玛干沙漠,为孔雀河与塔河下游冲积平原,地形平坦。研究区属于大陆性暖温带极端干旱气候,是中国乃至欧亚大陆最干旱的地区之一,多年平均降水量仅为33.7 mm,且集中在6—8月份,而其潜在年蒸散量高达2 000 mm以上。年均温约为10.7 °C,≥10 °C年积温为4 167.7 °C,年太阳总辐射量为6 180 MJ/m²,年日照数约3 118.7 h,无霜期220 d。常年沙尘暴多发,春季尤为频繁。塔里木河下游的



数字为断面编号。The number represents transect code.

图1 塔里木河下游断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transects in the lower reaches of Tarim River

植被可划分为胡杨群落和柽柳群落两大类, 主要分布在河道两岸 1~2 km 的范围内, 沿着河道形成一条狭长的带状。植被类型主要为乔木胡杨(*Populus euphratica*)和灌木柽柳(*Tamarix* spp.), 同时伴生少量灌草, 如铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)、花花柴(*Karelinia caspia*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、野生黑枸杞(*Lycium ruthenicum*)、芦苇(*Phragmites communis*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)等。塔里木河下游因近 50 年人类活动影响, 生态环境不断恶化, 下游植被退化, 土地沙化。其地带性土壤被风力作用剥蚀干净, 土壤类型主要以风成沙土为主, 发育期短。土壤质地在剖面分布上层次交错, 反映了塔里木河下游成土过程和风积过程交替进行。

2 研究方法

2.1 断面及样点选择

在塔里木河下游近 200 km 的河道上选择了 16 个断面(图 1), 每个断面均垂直于河道方向, 断面间距约 10~15 km。同一断面上的样点均在河道同侧。在野外踏查的基础上, 根据河道的距离和植被盖度、类型变化, 在每个断面上选择典型样点, 所有断面总计 67 个样点。对每个样点进行土钻取样, 1 m 深度内, 每隔 10 cm 取样, 1 m 深度以下每隔 20 cm 取样, 在接近地下水位时, 再每隔 10 cm 取样, 直到地下水位。采用手持 GPS 记录每个样点的经纬度坐标。铝盒内的土样采用烘干法测定土壤含水量, 自封袋内土样风干后过筛并用激光粒度仪法测定土壤质地。针对不同质地土壤采用环刀取原状土并测定土壤水分特征曲线。取样的同时, 对每个样点进行植被调查。由于塔河下游植被分布呈斑块, 为保证调查精度^[19], 以样点为中心, 用皮尺和测绳围成一个 50 m×50 m 的样方。调查的指标包括: 种类、数量、高度、冠幅、胡杨胸径。树高采用目测法根据相似三角形原理计算获得。冠幅和胡杨胸径采用皮尺测定。根据冠幅投影面积计算样地植被盖度。

2.2 定点观测

定点观测分别在塔里木河下游河岸林生态系统中长势较好的一片胡杨林地(断面⑤)和一片柽柳林地(断面③)中进行(图 1)。两片林地相距 12 km, 其中柽柳林位于 40°27'36"N, 87°54'13"E, 海拔 846 m, 胡杨林位于 40°25'59"N, 88°01'34"E, 海拔 844 m。为揭示塔里木河下游河岸林带水分变化过程, 考虑到地下水-土壤-植物-大气是一个动态系统, 对地下水位、土壤含水量、地表蒸散和大气状况

进行了联合观测。通量观测设备工作原理及布设方式详见文献^[1]。土壤湿度传感器(FDS100, 北京联创思源科技有限公司)分别布设在各自通量观测塔下, 半径 3 m 以内, 进行土壤含水量观测。胡杨林内分别埋设在 0.1、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 和 4.5 m 深处; 柽柳样地内的布设深度分别为 0.1、0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0 和 5.0 m。数据由各自涡度观测的数采器统一采集并存储, 土壤水分数据由烘干法标定。在胡杨和柽柳通量观测塔附近各设一口地下水观测井, 井深分别为 15 m 和 20 m, 采用压力式水位自动观测传感器(CTD-Diver, the Netherlands)对地下水埋深进行连续自动观测, 数据采集频率为 0.5 h。柽柳林监测时间 2012 年 1 月到 2014 年 12 月; 胡杨林监测时间 2014 年 7 月到 2015 年 10 月。

2.3 室内分析与数据处理

土壤水分特征曲线采用离心机测定不同吸力段的土壤含水量值, 然后采用 Van Genuchten 方程^[20]进行拟合, 拟合工具采用 Hydrus-1D 模型中的 RETC 模块。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_s + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h > 0 \end{cases}$$

式中: $\theta(h)$ 为土壤含水率, g/g; h 为土壤水吸力, cm; θ_s 、 θ_r 、 α 、 m 、 n 为土壤水分特征曲线的参数, 其中 θ_s 、 θ_r 分别为土壤饱和含水率和剩余含水率, g/g; $m = 1 - 1/n$ ($n > 1$)。

土壤质量含水量采用烘干法测定, 并对每个采样点从表层到地下水位面进行加权平均, 代表该点所在样地的平均土壤含水量:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum \theta_i D_i}{H}$$

式中: θ_i 为每个点不同深度(层次)土壤质量含水量, g/g; D_i 为对应的土层厚度, cm; H 为土层总厚度, cm。

土壤机械组成采用 MS-2000 激光粒度仪测定。按照国际制对划分土壤质地类型。

采用数据分析和制图软件 Origin 8.5 绘图, 统计软件 SPSS 13.0 for Windows 进行相关分析。

3 结果与分析

3.1 胡杨和柽柳样地统计特征

选取塔里木河下游代表性植物胡杨和柽柳作为研究对象, 分别对其样地群落特征进行统计(表 1)。统计结果显示, 乔木胡杨的高度、冠幅、高度整体上大于灌木柽柳。胡杨样地的地下水埋深和土壤含水

量分布范围跟柽柳样地大体一致,二者生态位重叠,研究区植物群落呈斑块分布。从变异系数上看,两种样地均表现出盖度>冠幅>高度。两种样地的地下水埋深和土壤含水量变异系数相近,但柽柳盖度、冠幅和高度的变异系数均大于胡杨。这结果表明,

在极端干旱区,胡杨和柽柳对环境因子变化的响应最明显的是盖度,且柽柳的响应更明显,对环境的适应能力更强。为弄清楚塔里木河下游植被分布特征,需进一步分析两种样地的植被特征和环境因子之间的关系,以及两种不同物种的用水策略。

表1 胡杨和柽柳样地统计特征

Tab. 1 Statistics of *Populus euphratica* and *Tamarix* spp. plots

样地类型 Plot type	项目 Item	高度 Height/m	胸径 DBH/m	冠幅 Canopy width/m	植被盖度 Vegetation coverage	地下水埋深 Groundwater depth(GWD)/cm	土壤含水量 Soil mass water content(SMWC)/(g·g ⁻¹)	根系深度 Root depth/m
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	最小值 Min.	0.34	0.04	0.40	0.02	370	0.03	>3
	最大值 Max.	15.08	1.04	12.52	0.54	750	0.17	
	平均值 Mean	6.43	0.32	4.65	0.17	533	0.08	
	变异系数 CV/%	40	50	44	79	20	53	
柽柳 <i>Tamarix</i> spp.	最小值 Min.	0.07		0.11	0.003	380	0.03	>3
	最大值 Max.	4.52		16.78	0.56	760	0.21	
	平均值 Mean	1.46		2.52	0.16	570	0.10	
	变异系数 CV/%	56		94	100	18	52	

3.2 地下水位和植被盖度的空间分布规律及其相互关系

地下水是影响极端干旱区植物生长和分布的重要因素。植被盖度是反映植被空间分布特征的重要指标。采用潜水层的地下水埋深作为地下水位指标,分析地下水位空间分布状况及其与植被盖度的关系。从图2可以看出,塔里木河下游地下水位变化范围为350~750 cm,随着离河道距离的增加而逐渐下降,两者

呈极显著对数关系。根据模拟结果发现,距离河道500 m 内地下水位下降较快,而500 m 外地下水位下降渐趋平缓(图2a)。研究区不同断面典型样地植被盖度变化范围为0~0.6,随着离河道距离增加而逐渐降低,两者呈指数函数关系(图2b)。在距离河道1 000 m 后,植被盖度迅速下降至0.2以下(图2b)。朱绪超等^[3]对塔河下游植被叶面积指数(LAI)进行研究发现,LAI 与离河道距离也具有显著的负指数关系。

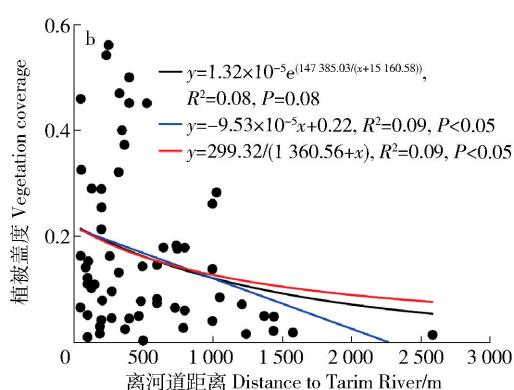
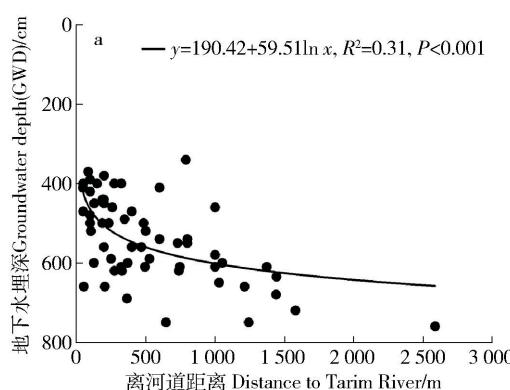


图2 塔里木河下游地下水埋深(a)和植被盖度(b)与离河道距离的关系

Fig. 2 Relationship of groundwater depth (a) and vegetation coverage (b) with the distance to Tarim River

同一类型植被盖度随着地下水位下降而降低(图3a),这与陈亚宁等^[5]的研究结果一致;然而,不同类型植被盖度与地下水位之间并没有显著的线性关系(图3b),表明塔河下游不同类型植被空间分布可能还受地下水位之外的其他因素影响。张海涛等^[21]研究发现土壤理化性质(土壤 pH、含水量、养

分含量等)的空间变异不仅促使区域植物数量特征发生明显变化,而且也影响群落的演替,同时植物的空间分布特征对土壤理化性质有明显的改良作用。

3.3 不同土壤质地对土壤持水性和植被盖度的影响

质地对田间持水量和土壤有效水含量有重要的影响。通常情况下,质地越黏,颗粒表面吸附力越

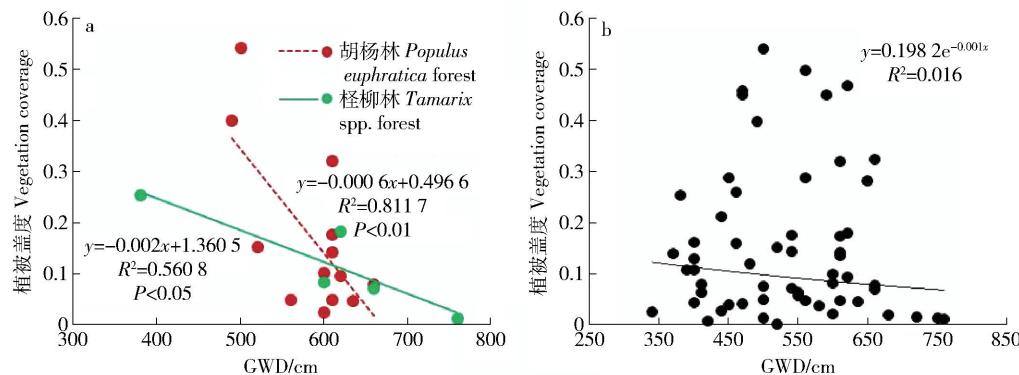


图3 塔里木河下游同一植被盖度(a)和不同类型植被盖度(b)与地下水位的关系

Fig. 3 Relationship of vegetation coverage in the same forest (a) and different forests (b) with groundwater table in the lower reaches of Tarim River

大,田间持水量和土壤有效水含量也越大^[22]。塔里木河下游粉壤土和沙土的质地差异最大,选取二者分别对其土壤持水性进行分析,并采用 van Genuchten 方程拟合土壤水分特征曲线,模拟参数结果见表 2。从表 2 可以看出, van Genuchten 方程能很好的拟合研究区沙土和粉壤土的土壤水分特征曲线,拟合精度 R^2 都在 0.96 以上。土壤质地对土壤不同吸力段的含水量变化趋势有重要影响^[22-23]。沙土在高水势段土壤水分含量下降非常快,在 -0.8 bar 时已接近永久凋萎点,而粉壤土在整个水势下降的过程中土壤含水量下降趋势平缓(图 4),持水能力较强。目前常用 -0.33 bar(1 bar = 1 019.7 cm 水柱高度)对应的土壤含水量作为田间持水量,由于质地差异,参考已有研究结果^[22],我们将 -0.1 bar 对应的土壤含水量作为沙土田间持水量, -0.3 bar 对应的土壤含水量作为粉壤土的田间持水量。根据图 4a 的模拟结果,粉壤土的田间持水量(0.32 g/g)为沙土田间持水量(0.10 g/g)的 3 倍以上。以目前常用的 -15 bar 作为永久凋萎点,则粉壤土有效含水量(0.15 g/g)约为沙土有效含水量(0.09 g/g)的 1.6 倍。质地对土壤持水性的另一个影响是阻碍毛管水上升的高度和速率。史文娟等^[24]采用土柱试

验模拟夹砂层土体构型毛管水上升,结果表明砂层导致毛管水上升高度和速率降低。王丁等^[25]也发现砂层对水分有着明显的阻滞作用,因此砂层的存在对干旱区植物生长极为不利。

不同质地土壤持水能力不同将导致土壤含水量存在很大差异,从而间接影响植被分布特征。从图 5 可以看出,塔里木河下游植被盖度随土壤平均含水量增加而升高,两者之间呈极显著线性相关。这与张海涛等^[21]的研究结果一致,表明土壤性质对植被空间分布特征也具有重要影响,并且这种影响可能掩盖了植被盖度与地下水位之间的关系(图 3b)。

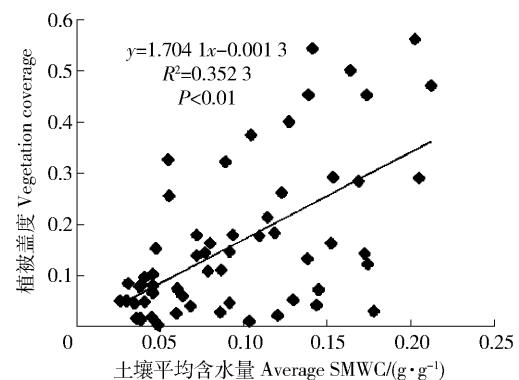


图5 植被盖度与土壤平均含水量的关系

Fig. 5 Relationship between vegetation coverage and SMWC

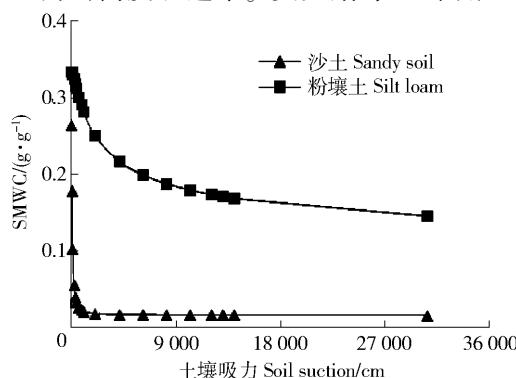


图4 土壤质地对土壤水分特征曲线的影响

Fig. 4 Effects of soil textures on soil water characteristic curves

表2 土壤水分特征曲线拟合参数统计

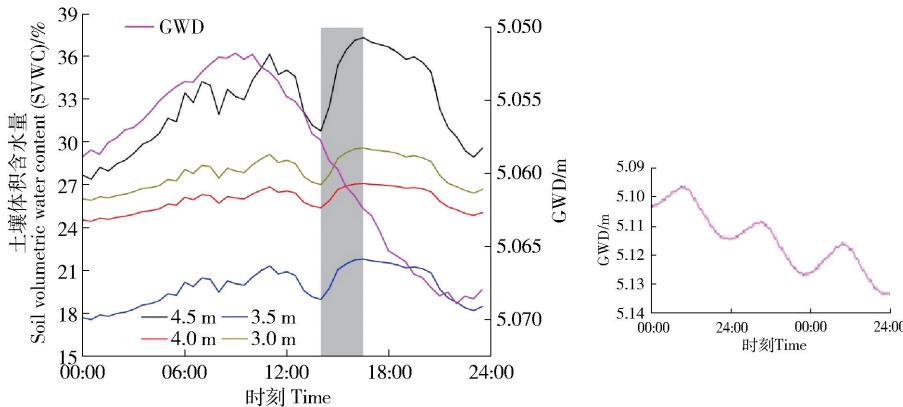
Tab. 2 Statistics of fitting parameters on soil water characteristic curve

参数 Parameter	θ_r	θ_s	α	n	m	R^2
沙壤土 Sandy loam	0.016	0.269	0.021	2.242	0.554	0.998
粉壤土 Silt loam	0.067	0.334	0.001	1.338	0.253	0.963

3.4 土壤含水量和地下水位动态变化特征及其对植物用水策略的指示意义

选取 2014 年生长盛期内(7 月 15 日至 9 月 15 日)胡杨林地土壤剖面深度 3.0、3.5、4.0、4.5 m 的

土壤含水量数据和地下水位数据,分别将其平均,得到相应的日波动过程(图6)。在胡杨生长盛期内,地下水位和不同深度土层土壤含水量都有明显的日波动过程,白天下降,夜晚上升。土壤含水量在白天呈现双峰波动,分别在上午11点和下午16点半达到峰值,并且第二个峰值的土壤含水量高于第一个峰值。由于3.0 m深度的土壤质地偏黏为粉壤土,3.5和4.0 m深度的土壤质地偏砂为砂壤土,因此3.0 m深度的土壤含水量高于下面3.5和4.0 m。



3.0 m、3.5 m、4.0 m 和 4.5 m 分别表示在 3.0、3.5、4.0 和 4.5 m 深土层的土壤体积含水量。3.0 m, 3.5 m, 4.0 m and 4.5 m represent SVWC at 3.0, 3.5, 4.0 and 4.5 m depth, respectively.

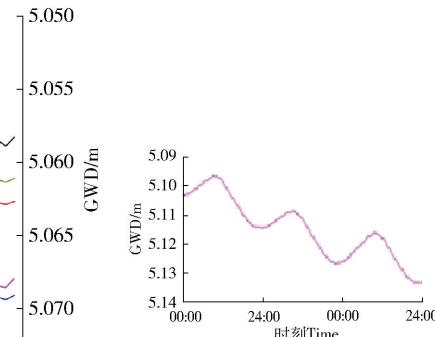
图6 生长盛期胡杨林土壤含水量和地下水位平均日波动过程

Fig. 6 Mean diurnal variations of SVWC and GWD in *Populus euphratica* observation site during the growing season in 2014

首先,土壤层3.0 m以下到地下水位层都有明显的日波动,表明胡杨直接吸收土壤水和地下水。在上午11:00开始,3.0~4.5 m深层次土壤含水量同步下降,并在14:00时同步达到白天相对低值,暗示胡杨根系在这一层次广泛分布,可以直接吸收土壤水。其次,胡杨有水力提升现象^[26]。在当地14:00,气温达到最高,此时胡杨蒸腾速率也达到最高阶段,观测样地蒸散约为0.5 mm/h,此后蒸腾速率开始下降,而土壤水分开始上升,在16:30达到第二个峰值(图6中灰色区域)。土壤含水量从夜间恢复到第一个高峰值历时11 h,但从14:00白天相对低值上升到第二个高峰值历时2.5 h,期间地下水位持续下降,说明胡杨有根系水力提升现象。胡杨作为乔木种,蒸散比灌木种高得多,LAI为0.57的胡杨群落日均耗水为4.52 mm,相同LAI下的柽柳群落为2.58 mm^[1]。巨大的蒸散消耗促使胡杨生长在水源附近,一般分布在河道两岸,通过其四通八达的水平侧根系吸收水源附近浅层土壤水满足其水分需要。而胡杨水力提升作用有助于其侧根发育,在野外其侧根发育长度可达40 m,这对胡杨在极端干旱气候下应对水分胁迫具有重要意义。

与胡杨不同,柽柳的根系吸水主要以吸收地下水或近地下水位饱和土壤水为主。地下水位相对稳

在没有河水补给的情况下,地下水位在日波动中逐渐平稳下降(图6内小图),大约维持在5.0~5.5 m的范围内。已有的研究表明,土壤含水量和地下水的日波动过程主要受到水分的消耗过程即胡杨的蒸腾过程控制^[1]。在极端干旱内陆河流域,考虑到土壤水同时受到地表水和地下水的影响,且地表干沙层的存在抑制土壤蒸发,因此,可以根据生长盛期内土壤含水量和地下水的日变化过程推测干旱区植物的用水策略。



定下,柽柳样地土壤含水量在生长盛期日波动规律一致。在柽柳生长盛期内(图7),0.3~4.0 m的土壤含水量几乎没有变化,而5.0 m深度土壤含水量和地下水位(此时,地下水埋深在5.0 m左右波动)均呈现明显的日波动过程。专注于利用能够稳定供给的深层土壤水和地下水的用水策略是柽柳超强的水分适应能力一个重要原因。有研究表明,柽柳的叶片生理活动对降雨过程几乎不作出响应^[27]。与胡杨大量发育侧向根系不同,柽柳的吸收根通常在含水量最高的区域大量发育,有很强的趋水性,因此,柽柳根更多地是向下生长^[28]。柽柳地上部分冠层高度通常低于2 m,但其根则可以深入地下10 m以下,地下生物量比地上生物量要高出许多,这种根系发育特征保证了柽柳对深层水分的吸收。

4 结 论

采用取样测定和点位监测的方法对塔里木河下游植被空间分布和影响因素进行了研究,结果表明地下水位和植被盖度随着离河道距离增加分别呈显著性对数和指数下降关系。不同质地对土壤持水性有显著差异,粉壤土的田间持水量(0.32 g/g)为沙土田间持水量(0.10 g/g)的3倍以上,前者的有效含水量约为后者的1.6倍。植被盖度受地下水位和

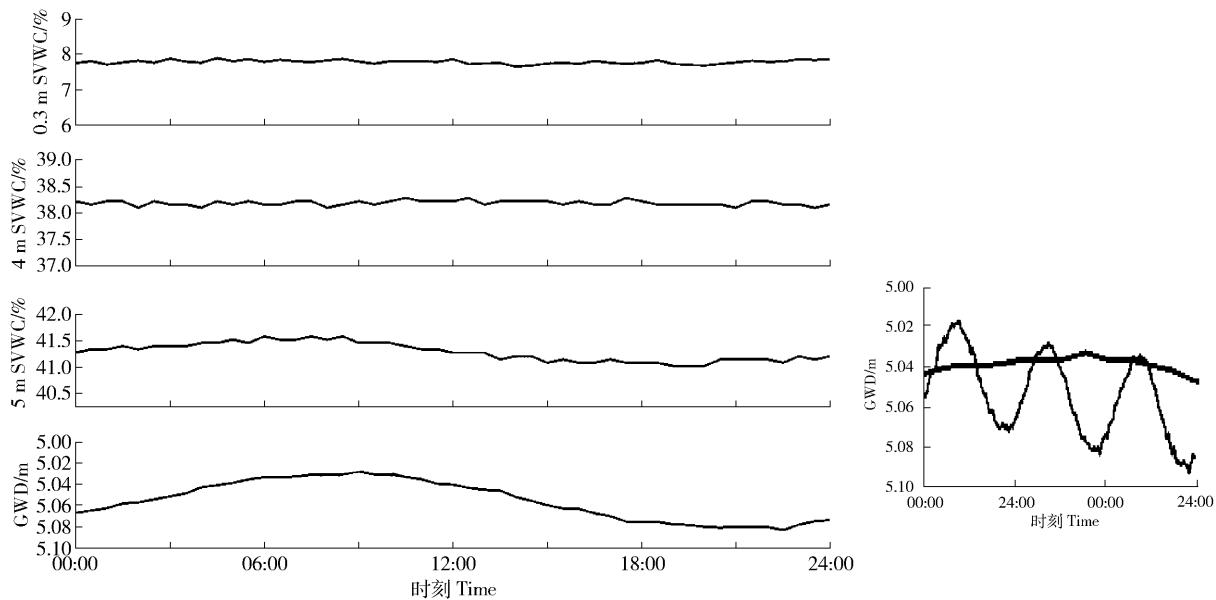


图 7 生长盛期柽柳林土壤含水量和地下水位平均日波动

Fig. 7 Mean diurnal variations of SVWC and GWD in *Tamarix* spp. observation sites during the growing season in 2014

土壤含水量的共同影响。胡杨和柽柳均具有适应极端干旱环境的能力,但二者用水策略不同。胡杨根系可以直接吸收地下水和土壤水,且在生长季有明显的水力提升现象;柽柳根系主要吸收地下水和近地下水位饱和土壤水。

参 考 文 献

- [1] YUAN G F, LUO Y, SHAO M A, et al. Evapotranspiration and its main controlling mechanism over the desert riparian forests in the lower Tarim River Basin [J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(6): 1032–1042.
- [2] 于军,王海珍,陈加利,等. 塔里木河流域荒漠河岸林胡杨群落的空间格局研究 [J]. 中国沙漠,2011, 31(4):913–918.
- [3] YU J, WANG H Z, CHEN J L, et al. Spatial pattern of *Populus euphratica* community of desert riparian forest in Tarim River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4):913–918.
- [4] 朱绪超,袁国富,邵明安,等. 塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征 [J]. 植物生态学报,2015, 39(11):1053–1061.
- [5] ZHU X C, YUAN G F, SHAO M A, et al. Spatial pattern of riparian vegetation in desert of the lower Tarim River Basin [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39 (11): 1053–1061.
- [6] 安红燕,徐海量,叶茂,等. 塔里木河下游胡杨径向生长与地下水的关系 [J]. 生态学报,2011, 31(8):2053–2059.
- [7] AN H Y, XU H L, YE M, et al. The relationship between *Populus euphratica*'s radial increment and groundwater level at the lower reach of Tarim River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (8):2053–2059.
- [8] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响 [J]. 地理学报,2003, 58(4):542–549.
- [9] CHEN Y N, LI W H, XU H L, et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4):542–549.
- [10] 李香云,张蓬涛,章予舒. 塔里木河下游绿色走廊特点及衰败成因分析 [J]. 干旱区研究,2001, 18(4):26–30.
- [11] LI X Y, ZHANG P T, ZHANG Y S. Analysis on the features and the decline causes of the green corridor at the lower reaches of the main stream of Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2001, 18 (4):26–30.
- [12] 樊自立,马英杰,张宏,等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定 [J]. 干旱区地理,2004, 27(1):8–13.
- [13] FAN Z L, MA Y J, ZHANG H, et al. Research of eco-water table and rational depth of groundwater of Tarim River drainage basin [J]. Arid Land Geography, 2004, 27(1):8–13.
- [14] 陈亚宁,王强,李卫红,等. 植被生理生态学数据表征的合理地下水位研究;以塔里木河下游生态恢复过程为例 [J]. 科学通报,2006, 51(增刊1):7–13.
- [15] CHEN Y N, WANG Q, LI W H, et al. Study on reasonable ground water level represented by vegetation physiological ecology data, taking ecological recovery process for example in the lower reaches of Tarim River [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (Suppl. 1):7–13.
- [16] 徐海量,宋郁东,王强,等. 塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响 [J]. 植物生态学报,2004, 28(3):400–405.
- [17] XU H L, SONG Y D, WANG Q, et al. The effect of groundwater level on vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(3):400–405.
- [18] 胡顺军. 塔里木河干流流域生态-环境需水研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2007.
- [19] HU S J. Research on eco-environmental water requirement of Tarim Mainstream Watershed [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007.
- [20] 刘新华,徐海量,凌红波,等. 塔里木河下游生态需水估算 [J]. 中国沙漠,2013, 33(4):1198–1205.
- [21] LIU X H, XU H L, LING H B, et al. Ecological water requirements in the lower reaches of the Tarim River [J]. Journal

- of Desert Research, 2013, 33(4):1198-1205.
- [12] 李卫红,郝兴明,覃新闻,等.干旱区内陆河流域荒漠河岸林群落生态过程与水文机制研究[J].中国沙漠,2008,28(6):1113-1117.
- LI W H, HAO X M, QIN X W, et al. Ecological process of desert riparian forest communities and its hydrological mechanism of inland river basin in arid area [J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6):1113-1117.
- [13] 李开封,穆桂金,徐立帅,等.塔里木河干流古河道表层沉积物粒度特征及其意义[J].水土保持通报,2012,32(1):161-164.
- LI K F, MU G J, XU L S, et al. Grain size characteristics and their significance for surface sediment of paleochannels along main stream of Taim River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1):161-164.
- [14] 季方,樊自立.塔里木盆地盐分循环变化与调控[J].干旱区研究,2000,17(4):33-38.
- JI F, FAN Z L. Study on the salt circulation change in Tarim Inland Basin under the impact of human activities [J]. Arid Zone Research, 2000, 17(4):33-38.
- [15] 季方,樊自立,马英杰,等.塔里木盆地潮湿冲积新成土形成特点[J].干旱区研究,2000,17(1):1-4.
- JI F, FAN Z L, MA Y J, et al. Formation characteristics of Aquic Alluvic Entisols in Tarim Basin [J]. Arid Zone Research, 2000, 17(1):1-4.
- [16] 季方,樊自立,赵虎.塔里木盆地冲积新成土土壤质地对土壤性状的影响[J].土壤,1999(3):15-20.
- JI F, FAN Z L, ZHAO H. The effect of soil texture of Aquic Alluvic Entisols on soil characteristics in Tarim Basin [J]. Soil, 1999(3):15-20.
- [17] 季方,马英杰,樊自立.塔里木河冲积平原胡杨林的土壤水分状况研究[J].植物生态学报,2001,25(1):17-21.
- JI F, MA Y J, FAN Z L. Soil water regime in *Populus euphratica* forest on the Tarim River alluvial plain [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(1):17-21.
- [18] 周斌.河水漫溢对荒漠河岸林植被及土壤的影响[D].乌鲁木齐:新疆大学,2011.
- ZHOU B. Effect of river-flooding on desert riparian plant community and soil [D]. Urumchi: Xinjiang University, 2011.
- [19] 牛俊勇,徐海量,李吉政,等.塔里木河下游荒漠河岸林群落最小取样面积[J].生态学杂志,2009,28(6):1182-1187.
- NIU J Y, XU H L, LI J M, et al. Minimum sampling area for desert riparian forest community in lower reaches of Tarim River [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(6): 1182-1187.
- [20] VANGENUCHTEN M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [21] 张海涛,梁继业,周正立,等.塔里木河中游荒漠河岸林土壤理化性质分布特征与植被关系[J].水土保持研究,2016,23(2):6-12.
- ZHANG H T, LIANG J Y, ZHOU Z L, et al. Relationship between distribution characteristics of soil physicochemical properties and vegetation in desert riparian forest in the middle reaches of the Tarim River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 6-12.
- [22] 李玉山,韩仕峰,汪正华.黄土高原土壤水分性质及其分区[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1985(2):1-17.
- LI Y S, HAN S F, WANG Z H. Soil water properties and its zonation in the Loess Plateau [J]. Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1985(2):1-17.
- [23] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. Soil physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [24] 史文娟,汪志荣,沈冰,等.夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J].水土保持学报,2004,18(6):167-170.
- SHI W J, WANG Z R, SHEN B, et al. Soil capillary water upward movement from sand layered soil column [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6):167-170.
- [25] 王丁,费良军.层状土壤上升毛管水运移特性试验研究[J].地下水,2009,31(1):35-37.
- WANG D, FEI L J. Rising capillary water transported characteristics of layered soil [J]. Groundwater, 2009, 31 (1): 35-37.
- [26] 鱼腾飞,冯起,司建华,等.胡杨根系水力再分配的模式、大小及其影响因子[J].北京林业大学学报,2014,36(2):22-29.
- YU T F, FENG Q, SI J H, et al. Patterns, magnitude and controlling factors of hydraulic redistribution by *Populus euphratica* roots [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(2): 22-29.
- [27] XU H, LI Y. Water-use strategy of three central Asian desert shrubs and their responses to rain pulse events [J]. Plant & Soil, 2006, 285(1-2): 5-17.
- [28] ZENG F J, LU Y, LIU B, et al. One-year-old seedling biomass distribution and root architecture characteristics differed between two desert plants: *Tamarix ramosissima* and *Alhagi sparsifolia* [J]. Arid Land Research & Management, 2013, 27(3): 298-302.

(责任编辑 范娟
责任编委 余新晓)